



TITLE:

# <大学の研究・動向> 核融合炉用超電導マグネットの高磁場化、小型化をめざした超流動ヘリウム冷却特性の研究

AUTHOR(S):

塩津, 正博; 白井, 康之

---

CITATION:

塩津, 正博 ...[et al]. <大学の研究・動向> 核融合炉用超電導マグネットの高磁場化、小型化をめざした超流動ヘリウム冷却特性の研究. Cue 2000, 6: 8-11

ISSUE DATE:

2000-12

URL:

<https://doi.org/10.14989/57814>

RIGHT:

# 核融合炉用超電導マグネットの高磁場化、小型化をめざした 超流動ヘリウム冷却特性の研究

エネルギー科学研究科 エネルギー応用化学専攻

応用熱科学講座 プロセスエネルギー学分野

教授 塩 津 正 博

shiotu@uji.energy.kyoto-u.ac.jp

助教授 白 井 康 之

shirai@pe.energy.kyoto-u.ac.jp

## 1. はじめに

核融合炉においては、一億度に近い超高温プラズマを閉じ込めておくために、強い磁場を必要とする。この強い磁場生成に必要な電力を核融合発電出力に比して著しく小さい値とするには、超伝導マグネットの利用が不可欠であり、核融合炉心の研究開発の進展と並行して、液体ヘリウム冷却大型超伝導マグネットの研究開発が、日本をはじめ欧米諸外国で取り組まれている。

この様な、核融合炉並びにエネルギー貯蔵装置用の大型超伝導コイルの研究開発にとって装置の小型化と、その安定化が最も重要な研究開発の目標である。コイル捲線には、強い磁場下で大きな臨界電流密度を持ち機械的強度も大きいニオブチタン等の金属系の超伝導線が使われており、それらの臨界温度が低い液体ヘリウム冷却が必要である。普通の液体ヘリウム（常流動ヘリウム）を2.17K以下に冷却すると、全く異なった性質を持つ量子液体である超流動ヘリウムとなる。超流動ヘリウム（He II）は、粘性がなくコイル捲線間の狭い隙間にも自由に浸透出来ること、局所的に熱が発生した場合に熱を強制的に取り去る性質がある等、常流動ヘリウム（He I）に比し、革新的に優れた安定な冷却特性を持ち核融合実験装置や超伝導磁気エネルギー貯蔵装置、加速器等に用いられる大容量超伝導マグネットの小型化のための有力な冷却材として期待されている。

超流動ヘリウム冷却超伝導マグネット設計には、超流動ヘリウムの冷却特性の正確な理解が必要である。これまでに側面を断熱した管内に満たされたHe II 中を熱が軸方向に一次的に流れる場合（1次元チャネル）における静的並びに動的冷却特性が理論的並びに実験的に明らかにされてきた。しかしながら、He II 中の捲線内では2次元ないし3次元冷却が行われることが予測され、2次元ないし3次元冷却設計基準の確立が必要であるが殆ど手がつけられていなかった。

当分野では、He II 中の捲線内で起こりうる定常及び非定常熱入力に対し各々の2次元ないし3次元冷却特性を解明し、一般的な冷却設計基準を確立することを目標として実験的並びに理論的研究を進めている。

## 2. 超流動ヘリウム

### 2. 1 ヘリウム4の状態図

ヘリウム（ヘリウム4）の圧力Pと温度Tの関係を示す状態図を図1に示す。ヘリウムは、他のクライオゲンや水等の通常液体と、以下の点で著しく異なっている。

- a) 3重点がない。固体状態を得るためには、液体の温度を十分に低くするだけでなく圧力も加えなければならない。
- b) 液体領域はλ線によって二つの領域He I 相とHe II 相に分けられる。λ線は、λ点（2.173 K、50.52mbar）からはじまり、λ'点（1.77K、30bar）に終わる。He I 相は通常の粘性流体であるが、He II 相では超流動現象が存在し液の基礎的性質が大きく変化する。

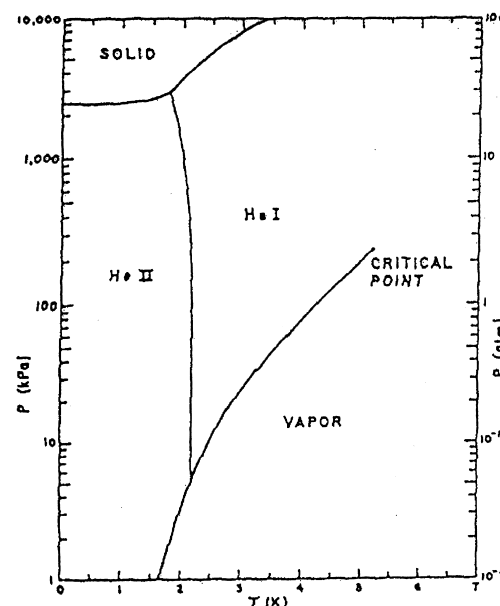


図1 ヘリウム4のPT状態図

### 2. 2 超流動現象と二流体モデル

He IIは、熱あるいは物質移動に関して、はっきりとした特異性を示し、そこで観察される現象は古典的な熱流体力学では全く取り扱えない。超流動現象を説明するため、London、Tisza、Landau等によって二流体モデルが提案された。このモデルではHe IIを相互作用の全くない二つの成分、スーパー成分とノーマル成分の理想的な混合と考える。ノーマル成分は普通の粘性流体のようにふるまい、スーパー成分だけが超流動性を示す。スーパー成分は粘性が零であるがエントロピもまた零である。従って、スーパー成分だけではエネルギーを輸送できない。このモデルによって、発見当初は不可解であった多くの現象に納得のいく定性的説明が与えられた。

定常状態における一次元チャンネル中の熱移送は二流体モデルで次の様に説明される。伝熱面近傍の液中で温度勾配が出来ると局所的にノーマル成分の比率が増加し、それを他の部分における比率と同一にするよう伝熱面に向かってくるスーパー成分と伝熱面からエントロピーを持って離れていくノーマル成分の対向流による一種の強制対流によって熱が除去される。スーパー成分の流れとノーマル成分の流れは等しく質量の移動は発生しない。熱流束が大きくなるに従い両成分の相対速度が大きくなり、ある臨界値を越えると、スーパー成分に渦糸が発生し、ノーマル成分との間に相互摩擦を生じるようになる。この熱流束以下の領域を層流領域、それ以上の領域を乱流領域と呼ぶ。乱流領域では、伝熱面から距離 $x$ だけ離れた位置における温度勾配 $dT/dx$ と、その点のチャンネル断面における熱流束 $q$  [W/m<sup>2</sup>]の間に、次式の関係がある。

$$-dT/dx = f(T) q^3 \quad (1)$$

ここで、 $T$ は温度、 $f(T) \equiv A \rho_n / (\rho_s^3 s^4 T^3)$ 、 $\rho_n$   $\rho_s$  はそれぞれノーマル成分とスーパー成分の密度、 $s$ は単位質量あたりのエントロピーである。この式は、Gorter-Mellink式と呼ばれている。 $f^{-1}(T)$ は、常流動液体の場合の熱伝導率と良く似た働きをする液の物性値の関数で、圧力と温度に依存する。

## 3. これまでの研究経過

### 3. 1 円柱試験発熱体における熱伝達特性

まずプールHe II中の種々な直径の充分長い円柱状試験発熱体から熱が半径方向に放射状に拡がる場合の熱伝達特性について研究を行った。実験は飽和条件及び大気圧下の加圧超流動条件で行ったが、

ここでは冷却特性の優れた加圧超流動条件の結果のみを説明する。

加圧超流動ヘリウム中の円柱発熱体における定常熱伝達曲線の一例を図2に示す。定常臨界熱流束（図中 $q_{st}$ ）に至る迄は非沸騰域でその熱伝達は極低温域に固有な一種のインピーダンス不整合によるKapitza Conductanceに支配されている。 $q_{st}$ に至ると熱伝達が極端に悪化し僅かな熱流束上昇によって発熱体表面温度が大きく上昇しKapitza Conductance領域から膜沸騰領域へ連続的に移行する。臨界熱流束点は、図1のPT状態図で、発熱面近傍の液が大気圧に於ける $\lambda$ 線上の値 $T_\lambda$ に到着し、超流動性を失って熱伝達が急激に悪化する点と考えられる。今、半径 $r_0$ の円柱発熱体がバルク温度 $T_B$ のHe II中に支持されており、その表面熱流束を $q_0$ とする。He II中の円柱中心から任意の半径 $r$ の円周上で1次元チャンネルのGorter-Mellink式が成り立つと仮定すれば、 $2\pi r_0 q_0 = 2\pi r q(r)$ 、 $-dT/dr = f(T) q(r)^3$ が成立するから、臨界熱流束は、次式で与えられる。

$$q_{st} = \left[ \frac{2}{r_0} \int_{T_B}^{T_\lambda} \frac{1}{f(T)} dT \right]^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

しかしながら、種々の直径の円柱を用い、液温度を広範囲に変えて求めた臨界熱流束実験結果は、(2)式より40%程度低い値を示した。実験結果に基づいて次の表示式を提示した。

$$q_{st} = 0.58 \left[ \frac{2}{r_0} \int_{T_B}^{T_\lambda} \frac{1}{f(T)} dT \right]^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

実験結果と(3)式の比較を図3に示す。実験結果が20%以内で記述されている。修正係数0.58が、2次元熱輸送における $f(T)^{-1}$ の減少を記述していると考え、 $f(T)^{-1}$ は1次元の場合の約20% ( $=0.58^3$ ) になる。熱が2次元的に広い空間に拡がっていく場合に、粘性を持つノーマル成分の流れに渦が発生して熱輸送が阻害される等の原因で等価熱伝導率のはるかに小さくなると推察された。

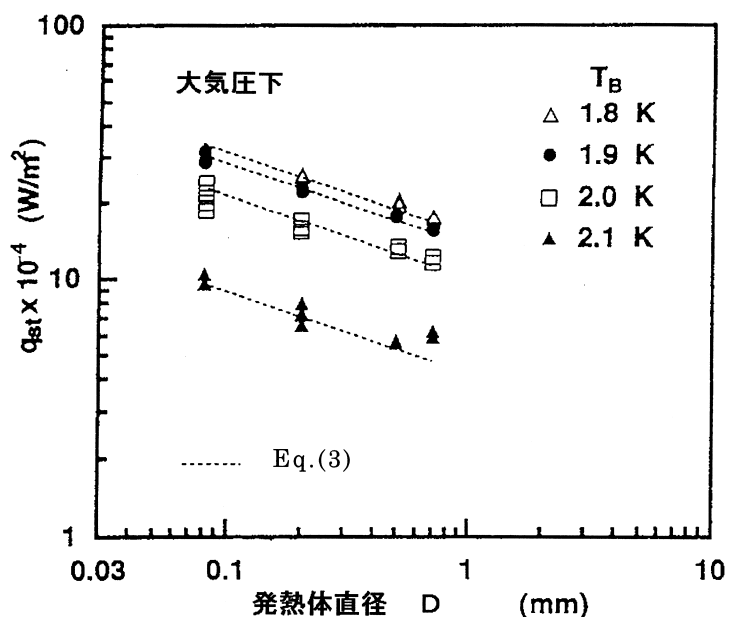


図3 臨界熱流束実験結果と(3)式の比較

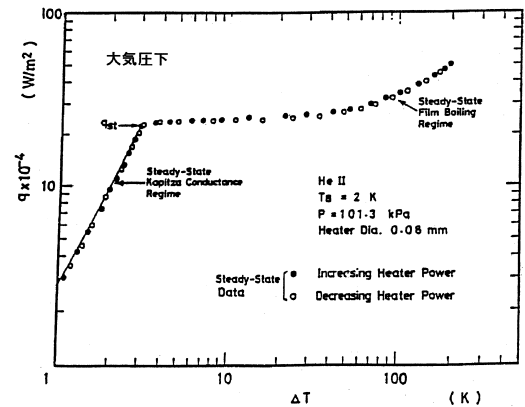


図2 加圧超流動ヘリウム中の円柱発熱体における定常熱伝達曲線

### 3. 2 ダクト一端の平板発熱体における熱伝達特性

次に、平板発熱体がダクト中において熱の拡がり方が制約を受ける場合について、研究を行った。

FRP板で構成された図4に示すような長さ100mmの方形ダクト一端のFRP板上にマンガン板を接着し片側断熱した発熱体を大気圧下のプールHe II中に支持した。ダクトは断面積の異なる4種類を用い、ダクト断面と試験発熱体との面積比 $A_d/A_h$ を1.0~3.5迄変えた。

図5は、臨界熱流束実験結果を $T_B$ に対してダクト断面積の発熱体表面積に対する比 $A_d/A_h$ をパラメータとして示す。図示するように、 $T_B$ が一定の場合、 $q_{st}$ は $A_d/A_h$ の増加と共に増加して $A_d/A_h=2.6$ 以上で一定値に漸近する傾向を示している。この一定値は、同一実験条件下におけるダクトが無い場合、つまり広いプール中の同一寸法平板発熱体における臨界熱流束実験結果と殆ど一致している。超流動ヘリウム中では、熱が周囲に均等に伝わりやすいと思われるのに、発熱体巾の僅か2.6倍の拡がりを経容しただけで臨界熱流束が広いプール中の値と一致してしまうのは、驚きである。熱の拡がりによる等価熱伝導率 $1/f(T)$ の減少効果が大きいためであろうと考えられる。

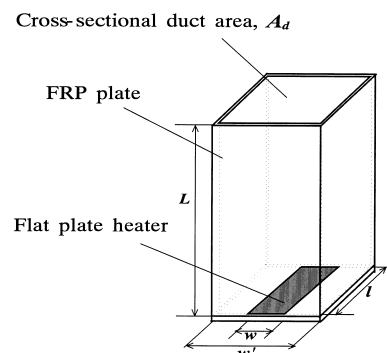


図4 ダクト一端の平板発熱体

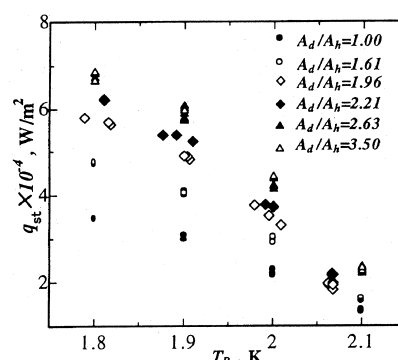


図5 ダクトにおける臨界熱流束実験結果とバルク液温の関係

### 3. 3 二次元数値解析

上述のような熱の拡がりがある場合の臨界熱流束とその機構を明らかにするため、二流体モデルの基礎方程式を差分法で解いて、定常臨界熱流束や過渡的な熱入力に対する膜沸騰に移行するまでの時間を求める数値解析を行っている。非線形が強いため幾多の困難があったが、最近、定常及び過渡共実験結果と良く一致する解が得られるようになってきている。例えば、図5に示すダクトの臨界熱流束実験結果は全て対応する条件の数値解と5%以内で一致している。図6は、臨界熱流束点における $A_d/A_h=1.6$ のダクト右半分の全流体速度ベクトル（スーパー成分とノーマル成分の速度ベクトル和）と温度分布を示す。予測したように試験発熱体近傍の熱の拡がり部で大きな渦が発生している。

### 4. おわりに

超流動ヘリウム冷却は、核融合炉、大型加速器、超電導エネルギー貯蔵装置等の大容量超電導マグネットの高磁場化、小型化に重要な技術として期待されている。今後、さらに広範囲な条件下で実験を行ってデータベースを提供すると共に、それらのデータに裏打ちされた2次元更には、3次元の数値解析コードを提供したいと考えている。

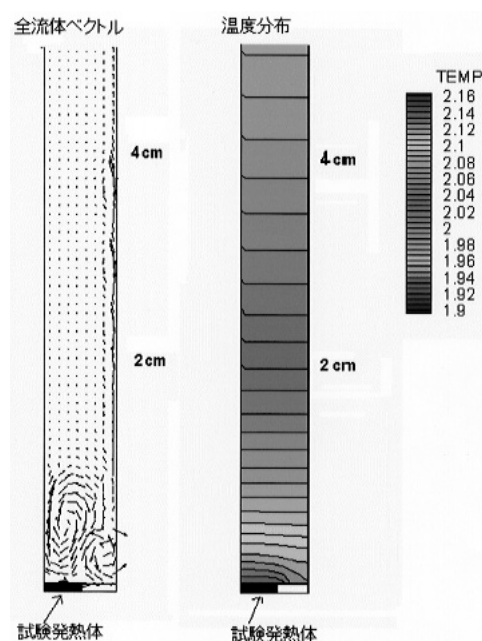


図6 臨界熱流束点における全流体の速度ベクトル（スーパー成分の速度ベクトル和）と温度分布（計算値）